

УДК 621.039.526;621.039.52.034.6;621.039.586

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЛИ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

© 2021 г. В. И. Альмяшев¹*, В. Б. Хабенский¹, Е. В. Крушинов¹, С. А. Витоль¹, С. Ю. Котова¹,
Е. В. Шевченко¹, Е. К. Каляго¹, А. А. Сулацкий¹, В. Ф. Стрижов², Н. А. Мосунова²

¹ФГУП «Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор, Россия

²ФГБУН «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН», Москва, Россия

*E-mail: vac@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.2020 г.

После доработки 20.11.2020 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

В статье приводятся результаты исследования высокотемпературного взаимодействия свинцового теплоносителя с материалом оболочки твэла перспективного реактора БРЕСТ-ОД-300. Экспериментально определена пороговая температура (1425°C), выше которой при выдержке в течение 30 мин наблюдается активная межзеренная диффузия свинца в сталь и унос капелек стали в расплав теплоносителя. Определено пространственное положение жидких фаз на основе свинца и стали при высокой температуре, близкой к температуре кипения свинца, а также пределы растворимости стали в свинце и свинца в стали при жидкофазном расслаивании системы «сталь–теплоноситель» при 1660°C.

DOI: 10.31857/S004036442105001X

ВВЕДЕНИЕ

Для новых проектов реакторных установок в отчетах по обоснованию безопасности одним из обязательных разделов является экспериментальное и расчетное обоснование безопасности при гипотетических тяжелых авариях, которые могут приводить к выходу рабочих параметров за допустимые пределы вплоть до разрушения активной зоны реактора [1].

Сложность моделирования тяжелых аварий в реакторной установке обусловлена необходимостью одновременного учета термогидродинамических и физико-химических процессов. Поэтому при экспериментальных исследованиях на стендовых установках предпочтительно использование прототипных материалов, а также обеспечение температурных условий, величин тепловых потоков, характеристик рабочих сред и материалов, идентичных или максимально приближенных к реакторным условиям [2].

В разрабатываемом в России проекте нового реактора на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300 в качестве теплоносителя используется расплав свинца, который имеет высокую температуру кипения, радиационно стоек, слабо активизируется в процессе эксплуатации реактора, химически пассивен при контакте с водой и воздухом, что должно позволить осуществить теплоотвод от активной зоны при низком давлении и исключить пожары, химические и

тепловые взрывы при разгерметизации контура [2]. Сочетание перечисленных свойств теплоносителя, применение нитридного топлива, имеющего высокую температуру деградации, оптимальные химические и теплофизические характеристики, а также конструкционные решения активной зоны должны обеспечить реакторам серии БРЕСТ качественно новый уровень безопасности [3, 4].

Однако, учитывая перспективность использования реакторов серии БРЕСТ в атомной энергетике России и, в перспективе, за рубежом, для убедительного доказательства преимуществ проекта БРЕСТ-ОД-300 необходимо проведение комплекса экспериментальных исследований малоизученных процессов в реакторе при гипотетических тяжелых авариях.

Такие исследования позволят скорректировать и верифицировать модели взаимодействия свинцового теплоносителя с оболочкой тепловыделяющих элементов, нитридным топливом, сталью облицовки бетонного корпуса реактора и самим бетоном при высоких температурах. Внедрение верифицированных моделей в интегральный расчетный код ЕВКЛИД [5, 6] позволит моделировать процессы, происходящие в реакторной установке при гипотетических тяжелых авариях, с высокой степенью достоверности прогнозов, а также разработать мероприятия по управлению тяжелой

Таблица 1. Химический состав исходных материалов

Материал	Содержание, мас. %										Примечание				
	Pb	Fe	Ag	Cu	Zn	Bi	As	Sn	Sb	Остальное					
Свинец марки С1	Основа	0.0007	0.0008	0.0007	0.0006	0.0029	0.0004	0.0005	0.0004	0.0020	Паспортные данные соответствуют ГОСТ 9559-89				
Сталь марки 16Х12МВСФБР-Ш	Не измерялось	С	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Al	Ti	V	W	Mo	Nb	S, P	Результаты РСФА*
		83.809	10.871	0.995	0.645	1.223	0.292	0.004	0.338	0.574	0.779	0.327	<0.010		

* Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ.

аварий, переводя безопасность проекта на более высокий уровень.

В рамках программы экспериментальных исследований выполнен эксперимент BR-01 по исследованию высокотемпературного взаимодействия материала оболочки твэла (сталь марки 16Х12МВСФБР-Ш) со свинцовым теплоносителем (свинец марки С1). Эксперимент выполнен на комплексе “Расплав”, обеспечивающем работу с прототипными материалами, идентичными реакторным температурным условиям [1]. В статье при-

водятся результаты выполненного исследования. В табл. 1 приведен химический состав используемых в работе материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И СПЕЦИФИКАЦИЯ

Эксперимент BR-01 по высокотемпературному взаимодействию свинцового теплоносителя со сталью оболочки твэла проводился на установке “Расплав-3” (рис. 1) во ФГУП “НИТИ им. А.П. Александрова” с использованием метода индукционной плавки в холодном тигле (ИПХТ) [7] для получения расплава и поддержания параметров взаимодействия в процессе эксперимента.

Метод отличается бесконтактным способом нагрева расплава, возможностью его значительного перегрева, длительностью поддержания системы в расплавленном состоянии как в инертной, так и в окислительной среде, а также возможностью корректировки состава расплава и отбора проб в процессе проведения эксперимента.

Экспериментальный комплекс “Расплав” предназначен для исследования процессов в высокотемпературном расплаве кориума и его взаимодействия с защитными и конструкционными материалами реакторных установок применительно к обоснованию безопасности реакторов типа ВВЭР, РWR и ВWR при тяжелых авариях с расплавлением активной зоны, что позволило отработать методические основы технологии проведения таких работ [8–10].

В состав комплекса “Расплав” входит информационно-измерительная система, предназначенная для автоматизации процесса регистрации параметров системы экспериментальных измерений, сбора, хранения и обработки информации. Пост-тестовые исследования включают физико-химический анализ элементного и фазового состава проб и фрагментов полученных слитков: рентгеноспектральный флуоресцентный ана-

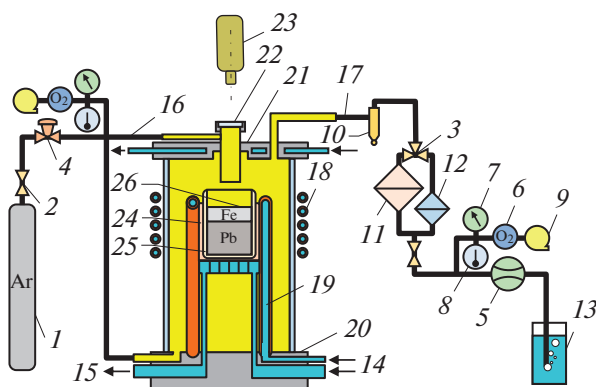


Рис. 1. Схема установки “Расплав-3”: 1 – баллон с инертным газом (Ag высокой чистоты), 2 – двухходовой вентиль, 3 – трехходовой вентиль, 4 – регулятор расхода, 5 – расходомер, 6 – датчик кислорода, 7 – датчик давления, 8 – датчик температуры, 9 – насос, 10 – циклон, 11 – фильтр Петрянова большой площади, 12 – фильтр Петрянова средней площади, 13 – гидрозатвор, 14 – вход охлаждающей воды, 15 – выход охлаждающей воды, 16 – входная газовая линия, 17 – выходная газовая линия, 18 – индуктор, 19 – секция холодного тигля, 20 – водоохлаждаемое дно тигля, 21 – водоохлаждаемая крышка печи с шахтой пирометра и портом подшихтовки и пробоотбора, 22 – кварцевое окно для видеозаписи состояния поверхности и регистрации ее температуры, 23 – видеокamera/пирометр, 24 – теплоизолирующая засыпка (корунд), 25 – керамический тигель, 26 – расплав.



Рис. 2. Вид образца стали, подготовленного для погружения в расплав теплоносителя.

лиз (РСФА), сканирующая электронная микроскопия с рентгеноспектральным микроанализом (СЭМ/РСМА), рентгенофазовый анализ (РФА), химический анализ (ХА), а также физико-химический анализ аэрозолей, в том числе определение скорости выхода и распределения частиц по размерам.

Установка “Расплав-3” состоит из индукционной печи, в которой расположен холодный тигель, высокочастотного генератора ВЧГ-7 с частотой тока индуктора 120 кГц и установленной мощностью 100 кВт, газо-аэрозольной системы, обеспечивающей атмосферу над расплавом – сухой Ag высокой чистоты и сбор аэрозолей для последующего анализа.

Диаметр холодного тигля составлял 70 мм, а диаметр керамического тигля, в котором находился расплав, – 45 мм. Пространство между керамическим (алундовым) тиглем и холодным тиглем было заполнено корундовым порошком. Во избежание просыпки корундового порошка зазоры между секциями холодного тигля были промазаны мелкодисперсным диоксидом циркония.

В керамический тигель был загружен листовой свинец марки С1 массой 952 г.

Для исследования высокотемпературной коррозии стали в расплаве свинца были изготовлены четыре погружных образца стали оболочки твэл реактора БРЕСТ-ОД-300 с (рис. 2).

Онлайн-измерения температуры поверхности расплава осуществлялись посредством пирометра спектрального отношения Raytek RAYMR1SCSF. Наряду с этим для измерения температуры в объеме ванны расплава использовалась периодически погружаемая в расплав термопара типа А (вольфрам–рений) в вольфрамовом чехле диаметром 3 мм.

ПРОЦЕДУРА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

После загрузки печи свинцом для удаления воздуха и создания инертной атмосферы печь продувалась аргоном в течение 10 мин с расходом 10 л/мин, включался высокочастотный нагрев и наплавлялась ванна расплава.

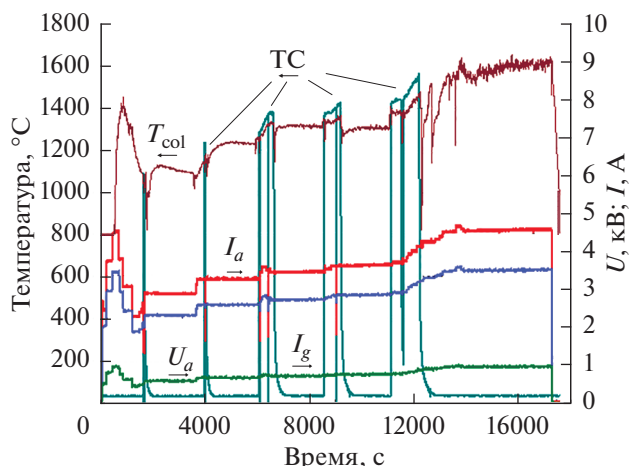


Рис. 3. Изменение во времени напряжения U_a , анодного тока I_a , тока сетки I_g , показаний пирометра T_{col} и погружной термопары типа А (ТС) в эксперименте BR-01.

Изменения во времени напряжения высокочастотного генератора U_a , его анодного тока I_a , тока сетки I_g , показаний пирометра T_{col} и показаний погружной термопары типа А (ТС) представлены на рис. 3. На рис. 4 приведены показания пирометра и термопары в начале и конце каждого периода выдержки образцов стали с, а также виды поверхности расплава в процессе выдержки и при кипении расплава свинца под слоем расплава стали.

Исследование процесса взаимодействия стальных образцов с расплавом свинца проводилось следующим образом (рис. 3 и 4). Последовательно увеличивались напряжение на аноде и, следовательно, температура расплава, которая контролировалась по показаниям пирометра и измерениям погружной термопары типа А. Их показания практически совпадали. На фиксированных температурных уровнях (1108, 1222, 1370 и 1424°C) производилось погружение и 30-минутная изотермическая выдержка стальных образцов в расплаве свинца на 1794, 4134, 6723 и 9280 с соответственно.

После извлечения четвертого образца на 11573 с производился отбор пробы расплава № 1. На 12300 с и при температуре расплава свинца 1560°C в него добавлялась сталь с двумя порциями в количестве 238 г, температура плавления которой по данным [11] составляет 1490–1510°C. Наблюдались плавление и разогрев слоя расплава стали до 1586°C. На 13618 с производился отбор пробы расплава № 2.

Далее увеличивалась вводимая в расплав мощность до достижения температуры кипения свинца. Наблюдались выход на поверхность газовых пузырей, интенсивное аэрозолеобразование, конденсация и падение капель на поверхность ванны

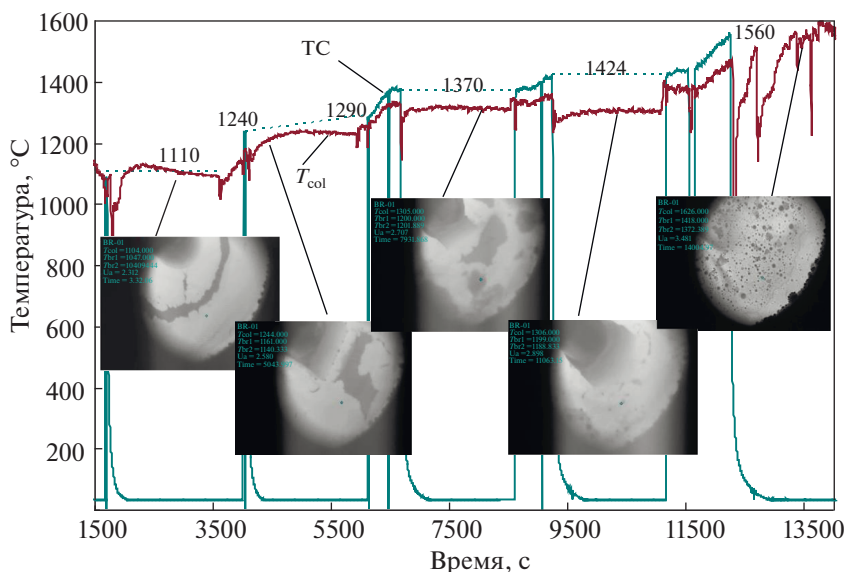


Рис. 4. Фрагмент термограммы с видеокадрами эксперимента BR-01.

(рис. 4), что указывает на кипение слоя расплава на основе свинца, находящегося под слоем на основе жидкой стали. Температура поверхности ванны расплава по данным пирометрических измерений составила 1660°C. После 60-минутной выдержки в указанных условиях на 17250 с производился отбор пробы расплава № 3 и на 17312 с высокочастотный нагрев был отключен.

Вид слитка, полученного охлаждением и кристаллизацией расплава и извлеченного из алундового стакана, приведен на рис. 5а. Макроструктура слитка представляет собой двухслойную систему. В верхней части слитка расположен слой закристаллизованной фазы на основе стали, а в нижней — на основе свинца. На рис. 5б приведены виды аксиальных разрезов верхней и нижней частей слитка с

указанием мест отбора проб для проведения физико-химического анализа (РСФА, СЭМ/РСМА).

На рис. 6 приведен вид образцов стали после погружения в расплав теплоносителя при различной температуре, на рис. 7 — вид шлифов образцов, подготовленных для проведения СЭМ/РСМА-анализа.

Элементный анализ продуктов плавки проводился рентгеноспектральным флуоресцентным методом на вакуумном спектрометре СПЕКТРОСКАН МАКС-GV [12].

Для определения содержания элементов в продуктах плавки использовался как метод регрессионного анализа, так и метод фундаментальных параметров. Для количественного анализа проб применялся метод фундаментальных параметров (МФП). Выбор данного метода объясняется отсутствием стандартных (эталонных) образцов, включающих в свой состав полный набор элементов, характерных для материала оболочечной стали. Относительные погрешности количественного безэталонного анализа зависят от содержаний определяемых элементов и составляют в диапазонах: 0,1–1,0 мас. % – 20%; 1–5 мас. % – 3–5%; 5–10 мас. % – 1–3%; более 30 мас. % – 0,5–2%.

Для основных компонентов метод МФП совмещался с методом регрессионного анализа, который позволяет повысить точность измерений содержания элементов в пробах. При пост-тест анализе образцов эксперимента BR-01 использовался регрессионный анализ по аналитической программе ЛГ32в-36в-56-64_var, в которой для построения градуировочных уравнений использованы комплекты ГСО ЛГ32в-36в и ЛГ 56-6.

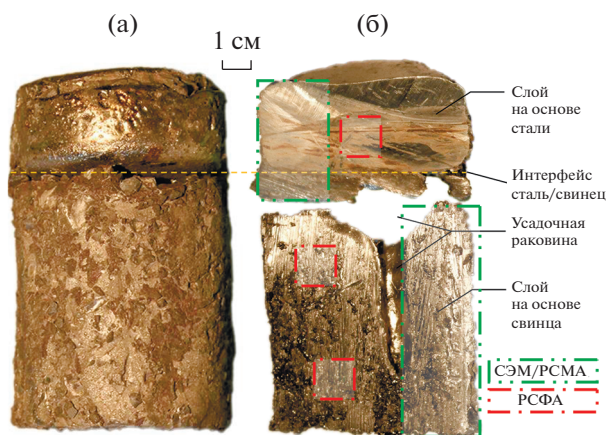


Рис. 5. Слиток из эксперимента BR-01: (а) — общий вид; (б) — аксиальный разрез.

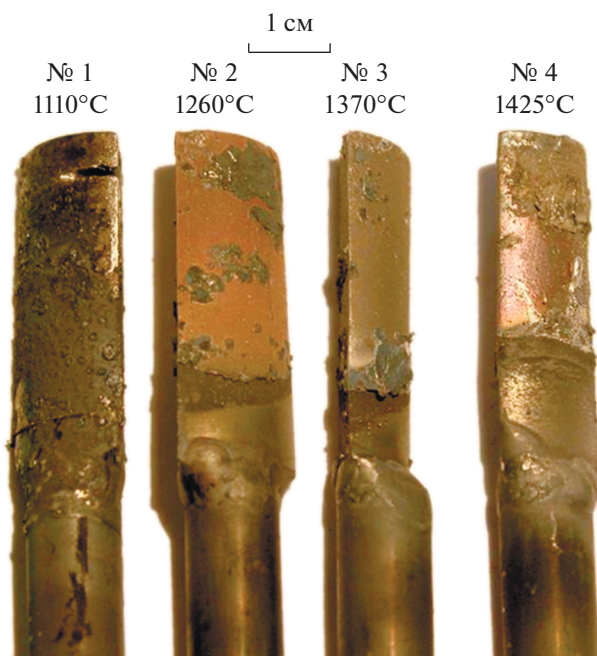


Рис. 6. Вид образцов стали после погружения в расплав теплоносителя.

В табл. 2 приведены результаты РСФА продуктов эксперимента BR-01.

Дебаланс по основным элементам составляет: по свинцу (Pb) – 0.04%, по железу (Fe) – 2.92%. На основании РСФА-анализа можно заключить, что в жидком (при температуре $>1580^{\circ}\text{C}$) и твердом состояниях в системе “теплоноситель–оболочка” растворимость основных компонентов друг в друге незначительна, что хорошо коррелируется с имеющимися данными по фазовым равновесиям в системе Fe–Pb [13–16]. На рис. 8 приведены имеющиеся экспериментальные и термодинамически оптимизированные версии диаграммы состояния системы Fe–Pb, на которых отмечена растворимость компонентов по данным эксперимента BR-01 (в допущении, что $\text{Fe} = \text{Fe} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{Mn}$). Следует отметить, что на имеющихся версиях диаграммы состояния не отражены фазовые переходы, отвечающие испарению железа и свинца, учет которых должен существенно повлиять на

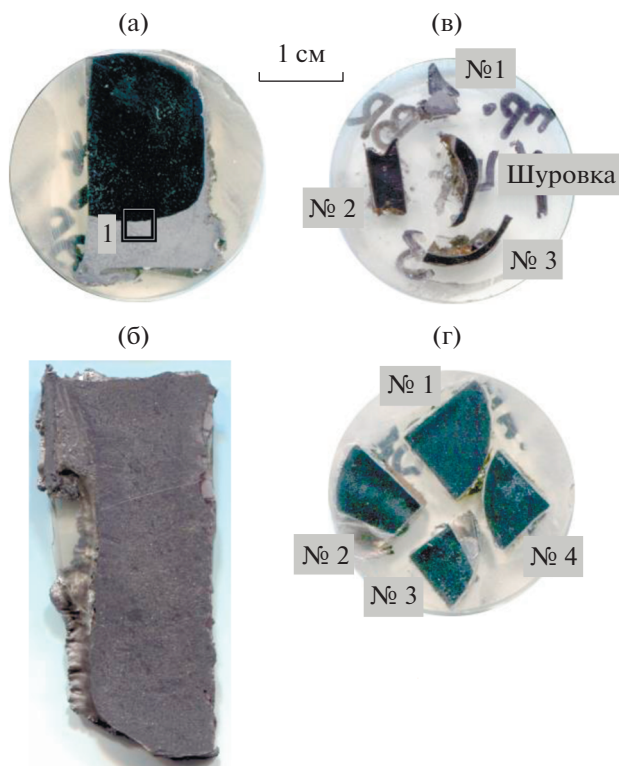


Рис. 7. Вид аншлифов эксперимента BR-01 с помеченными областями СЭМ/РСМА-исследований: (а) – область интерфейса между закристаллизованными слоями несмешивающихся жидкостей; (б) – свинцовая часть закристаллизованного слитка; (в) – пробы, отобранные в процессе проведения эксперимента; (г) – погружные образцы.

топологию высокотемпературной части фазовой диаграммы.

Детальный анализ микроструктуры, элементного и фазового состава образцов эксперимента BR-01 был выполнен методами СЭМ и РСМА.

Исследование образцов методом электронной микроскопии осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе HITACHI S-570 (Япония). Элементный анализ выделенных участков образцов производился с помощью системы микрозондового анализа Bruker Quantax (Германия).

Для каждого участка снималась спектральная характеристика, по которой определялся его ин-

Таблица 2. Результаты РСФА продуктов эксперимента BR-01

Позиция	Содержание, мас. %					Масса, г
	Pb	Fe	Cr	Ni	Mn	
Проба № 2	2.307	85.086	11.358	0.688	0.561	8.603
Проба № 3	0.235	86.998	11.203	1.023	0.541	10.671
Слой на основе стали	0.717	86.505	11.437	0.763	0.578	219.210
Слой на основе свинца	99.505	0.321	0.098	0.054	0.021	809.420

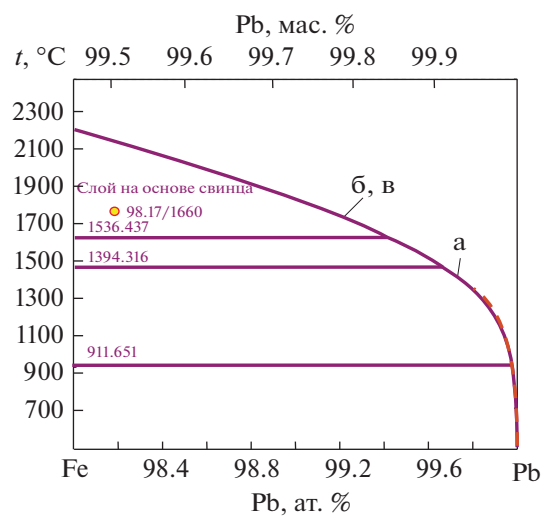
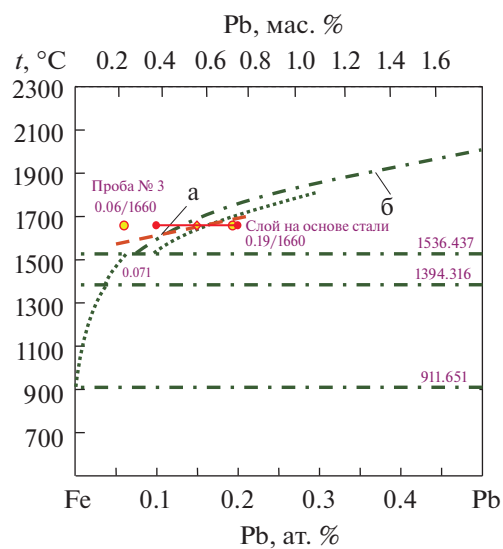
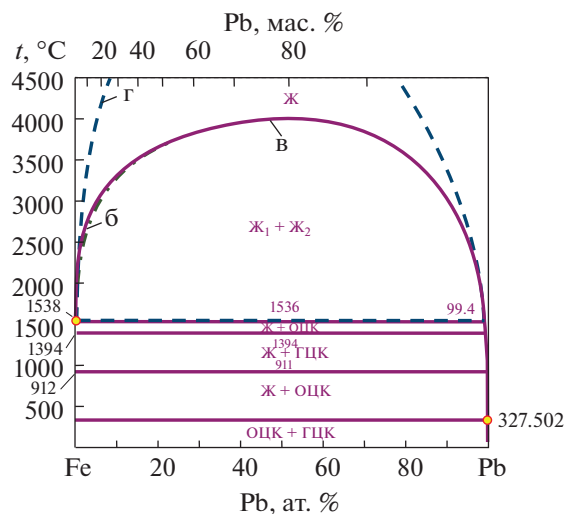


Рис. 8. Диаграмма состояния системы Fe–Pb по данным: (а) – [13], (б) – [14], (в) – [15], (г) – [16].

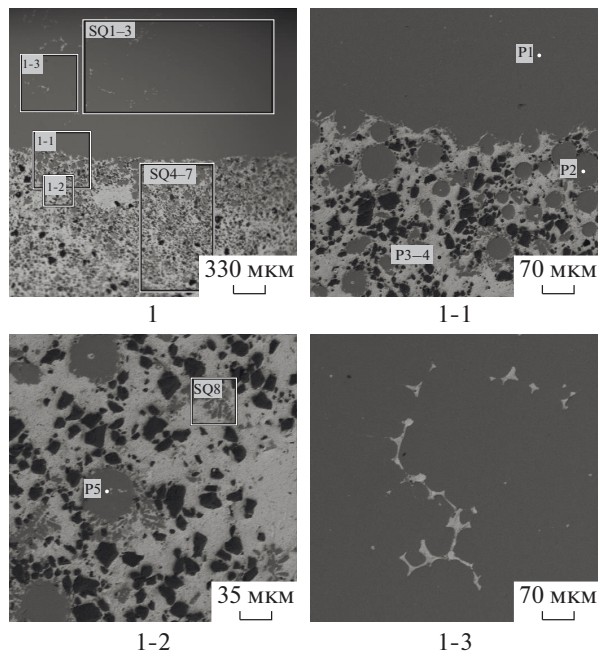


Рис. 9. Микрофотографии области интерфейса между закристаллизованными слоями слитка эксперимента BR-01.

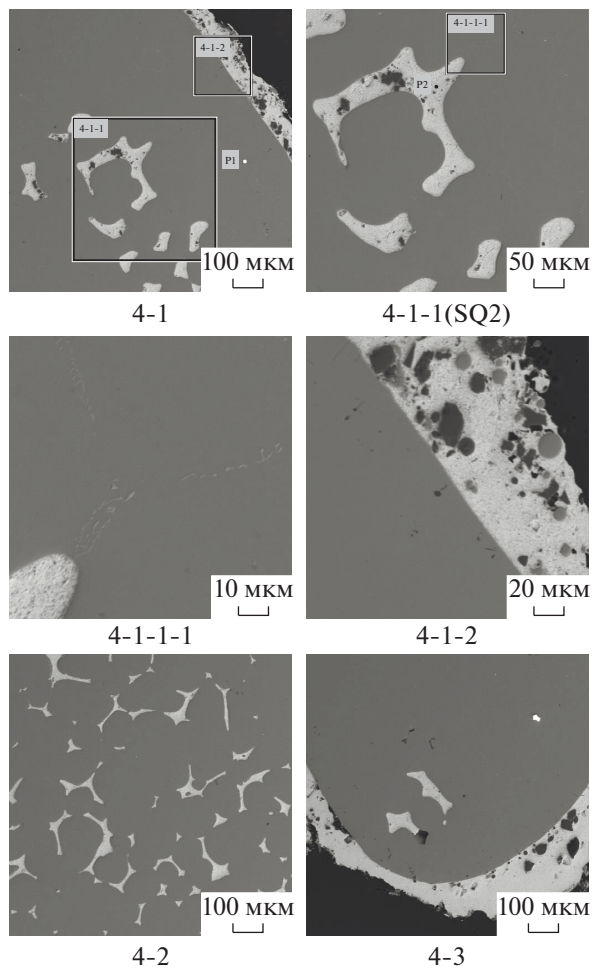


Рис. 10. Микрофотографии погружного образца № 4 (1425°C, 30 мин).

Таблица 3. Данные РСМА области 1 аншлифа *a*

№		Pb	Fe	Cr	Ni	Mn	V	W	Mo	Nb	Фаза	
SQ1	мас. %	0.4	85.4	9.5	1.8	1.9	0.3	0.3	0.4	—	Слой на основе стали	
	ат. %	0.1	85.4	10.2	1.7	2.0	0.3	0.1	0.2	—		
SQ2	мас. %	0.7	85.0	9.3	1.8	2.0	0.3	0.3	0.5	0.1		
	ат. %	0.2	85.2	10.0	1.7	2.1	0.3	0.1	0.3	0.1		
SQ3	мас. %	0.3	85.0	9.5	1.8	1.8	0.3	0.4	0.6	0.3		
	ат. %	0.1	85.2	10.2	1.7	1.8	0.3	0.1	0.4	0.2		
SQ4	мас. %	78.5	15.0	6.5								
	ат. %	49.1	34.8	16.1								
SQ5	мас. %	77.8	15.6	6.6								Слой на основе свинца с капельными включениями Fe вблизи интерфейса Fe–Pb
	ат. %	48.0	35.7	16.3								
SQ6	мас. %	81.0	12.4	6.5				—				
	ат. %	52.9	30.1	17.0								
SQ7	мас. %	80.7	10.9	8.3								
	ат. %	52.3	26.2	21.5								
P1	мас. %	0.5	80.2	11.1	0.9	1.9	0.4	1.0	0.6	3.3	Фаза на основе Fe	
	ат. %	0.1	81.7	12.2	0.9	2.0	0.5	0.3	0.4	2.0		
P2	мас. %	—	80.8	14.4	2.4	2.4				—	Капля на основе Fe	
	ат. %	—	80.0	15.3	2.3	2.4						
P3	мас. %	100									Pb	
	ат. %	100										
P4	мас. %	100										
	ат. %	100										
P5	мас. %	—	75.7	21.1	1.0	2.2				—	Капля на основе Fe	
	ат. %	—	74.5	22.3	0.9	2.2						
SQ8	мас. %	49.1	30.6	17.7	—	2.5				—	Дендрит Fe в Pb	
	ат. %	20.2	46.8	29.1		3.8						

тегральный состав и состав каждой разделенной фазы. Количественный анализ производился методом фундаментальных параметров с помощью программного обеспечения Bruker Esprit.

Предел уверенного определения элемента зависит от его порядкового номера в Периодической системе Менделеева и колеблется от 0.3 мас. % для легких элементов до 0.1 мас. % для тяжелых. Обнаружение меньших количеств элементов является ненадежным.

Рассмотрим сначала результаты исследования микроструктуры интерфейса между закристаллизованными слоями на основе стали и на основе свинца (рис. 9, табл. 3). В слое на основе железа наблюдаются включения свинца, доля которых уменьшается по мере отдаления от интерфейса. Элементный анализ интегрального состава слоя на основе железа показывает, что концентрация свинца в нем меняется от 0.7 мас. % в области интерфейса до 0.3 мас. % вблизи верхней границы

слитка. В слое свинца в непосредственной близости от интерфейса наблюдается скопление капельных включений на основе железа диаметром от 10 до 50 мкм. Доля железа в слое с капельными включениями составляет 13 мас. %. Капельные включения на основе железа, окруженные дендритно закристаллизованным железом, встречаются и в толще слоя на основе свинца. Природа капельных включений может быть связана с вторичным расслаиванием при охлаждении жидкости на основе свинца, пересыщенной железом. Доля железа в этом случае варьируется в пределах от 1.7 до 6.5 мас. %.

Результаты СЭМ/РСМА-анализа закристаллизованной части слитка на основе свинца свидетельствуют о наличии железа в ее объеме в виде капельных и дендритных включений.

Анализ образцов стали, выдержанных в расплаве свинцового теплоносителя при различных температурах, показывает, что для трех стальных образцов, выдержанных в течение 30 мин при температу-

рах 1110, 1260 и 1370°C, признаков взаимодействия стали и свинца, а также признаков деградации формы образцов не обнаружено. На поверхности образцов после их извлечения из расплава свинца встречаются зоны, покрытые свинцовой пленкой.

В образце, выдержанном в расплаве свинца 30 мин при температуре 1425°C, наблюдается активная межкристаллитная диффузия свинца в сталь по всей площади аншлифа (рис. 10). Доля свинца, продиффундировавшего в образец стали, варьируется от 2.0 до 5.1 мас. % в зависимости от доли межзеренных границ, заполненных свинцом. Также наблюдается капельный унос компонентов стали в теплоноситель с характерным размером капель 5–10 мкм.

Таким образом, можно утверждать, что температура активации диффузионных процессов находится в диапазоне 1370–1425°C при длительной выдержке в течение ~30 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При температуре 1425°C и длительной выдержке в течение 30 мин обнаружена межзеренная диффузия свинца в сталь и унос капелек стали в расплав теплоносителя. Определено пространственное положение жидких слоев свинца и стали при температуре, близкой к температуре кипения свинца. При этом расплав стали занимает верхнее положение, расплав свинца располагается под ним. При жидкофазном расслаивании системы “сталь–теплоноситель” при 1660°C наблюдается небольшая растворимость стали в свинце и свинца в стали. Отмечено интенсивное образование аэрозолей из двухфазного расплава системы “сталь–теплоноситель”, при этом основным компонентом состава аэрозолей является свинец.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулацкий А.А., Хабенский В.Б., Альмяшев В.И., Грановский В.С., Крушинов Е.В., Витоль С.А., Котова С.Ю., Шевченко Е.В., Каляго Е.К., Раба Б.О., Сулацкая М.Б. Взаимодействие металлического расплава двухжидкостного кориума с корпусной сталью // ТВТ. 2019. Т. 57. № 5. С. 702.
2. Рачков В.И., Сорокин А.П., Жуков А.В. Теплогидравлические исследования жидкометаллических теплоносителей в ядерных энергетических установках // ТВТ. 2018. Т. 56. № 1. С. 121.
3. Адамов Е.О., Габараев Б.А., Орлов В.В., Филин А.И. Опытнo-демонстрационный реактор БРЕСТ // Энергия: экономика, техника, экология. 2003. № 8. С. 24.
4. Орлов В.В., Смирнов В.С., Филин А.И., Сила-Новицкий А.Г., Леонов В.Н., Цикунов В.С., Баринoв С.В., Когут В.А. Детерминистическая безопасность реакторов БРЕСТ // ВАНТ. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. 2004. № 4. С. 88.
5. Мосунова Н.А. Интегральный код ЕВКЛИД/V1 для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Ч. 1: Базовые модели // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 69.
6. Усов Э.В., Бутов А.А., Чухно В.И., Климонов И.А., Кудашов И.Г., Жданов В.С., Прибатурич Н.А., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф. Учет пространственных эффектов при расчете тяжелых аварий с помощью интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Атомная энергия. 2019. Т. 127. № 1. С. 3.
7. Петров Ю.Б. Индукционная плавка окислов. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 104 с.
8. Альмяшев В.И., Хабенский В.Б., Крушинов Е.В., Витоль С.А., Сулацкий А.А., Шевченко Е.В. Исследования, выполненные на комплексе экспериментальных установок “Расплав” отдела исследований тяжелых аварий ФГУП “НИТИ им. А.П. Александрова” // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2020. № 4 (22). С. 69.
9. Granovsky V.S., Khabensky V.B., Krushinov E.V., Vitol S.A., Sulatsky A.A., Almjashev V.I., Bechta S.V., Gusarov V.V., Barrachin M., Bottomley P.D., Fischer M., Piluso P. Oxidation Effect on Steel Corrosion and Thermal Loads During Corium Melt in-vessel Retention // Nucl. Eng. Des. 2014. V. 278. P. 310.
10. Almjashev V.I., Granovsky V.S., Khabensky V.B., Kotova S.Yu., Krushinov E.V., Sulatsky A.A., Vitol S.A., Gusarov V.V., Fichot F., Michel B., Piluso P., Le Tellier R., Fischer M., Le Guennic C., Bakouta N. Experimental Study of Transient Phenomena in the Three-liquid Oxidic-metallic Corium Pool // Nucl. Eng. Des. 2018. V. 332. P. 31.
11. Бобков В.П., Блохин А.И., Румянцев В.Н., Соловьев В.А., Тарасиков В.П. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. Т. 5. Свойства реакторных сталей и сплавов / Под ред. Поплавского В.М. М.: ИздАТ, 2014. 584 с.
12. Лосев Н.Ф. Количественный рентгеноспектральный флуоресцентный анализ. М.: Наука, 1969. 336 с.
13. Кубашевски О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа. Спр. Пер. с англ. / Под ред. Петровой Л.А. М.: Металлургия, 1985. 183 с.
14. Vaajamo I., Taskinen P. A Thermodynamic Assessment of the Iron–Lead Binary System // Thermochim. Acta. 2011. V. 524. P. 56.
15. Okamoto H. Fe–Pb (Iron–Lead) // J. Phase Equilib. Diff. 2012. V. 33. P. 419.
16. SGTE 2017 Alloy Database. FactSage. 2017. http://www.crct.polymtl.ca/fact/phase_diagram.php?file=Fe-Pb.jpg&dir=SGTE2017